

論 文

[2073] 上下地震動により鉄筋コンクリート柱に生じる軸方向力の評価法

正会員○菊池健児（大分大学工学部）

正会員 吉村浩二（大分大学工学部）

1. はじめに

通常の中低層鉄筋コンクリート（以下、R Cと略す）造架構に対する現行の耐震設計法では、地震動の上下成分が建物の構造安全性に与える影響については特に考慮されていない。しかしながら、近年の建物の地震被害の中には上下地震動の影響があったと考えられる事例もいくつか報告されていることや、近年地震観測網が整備されるにつれ、地震動の水平成分よりも卓越した上下成分の加速度記録が得られつつあることなどを考慮すると、上下地震動がR C造建物の応力・変形に無視できない影響を及ぼすことが懸念される。

1975年大分県中部地震により大きな被害を受けたR C造ホテル1階が上階に比較して水平・鉛直剛性の低い層（いわゆる“Soft Story”）となっており、その被害調査報告[1]およびその後の研究により、1階柱の被害に地震動の水平成分ばかりでなく、上下成分も影響を及ぼした可能性が考えられることなどの観点から、筆者らは主に下層部にSoft Storyを有する中低層R C造有壁架構を対象として、上下地震動が架構の動的弾性挙動に及ぼす影響を数値解析により検討して来た[2, 3]。その結果、上下地震動が部材断面力に及ぼす影響は柱軸方向力に最も大きく現れ、最大加速度 100Gal の上下地震動により1階柱の軸方向力が鉛直荷重時軸方向力の約10%～40%程度増減すること、水平地震動によって比較的大きな曲げモーメントやせん断力が柱に発生する時刻において上下地震動による大きな柱軸方向力の増減が起こる場合があることなどが明らかになった。これらのこと考慮すると、特に震央距離が近い地震動（上下成分が水平成分より卓越する場合がある）などを受けることが予想されるR C造建物の下層部の柱の設計において、上下地震動を考慮する必要があるのではないかと考えられる。このような上下地震動による柱軸方向力の変動量を評価するにあたっては、建物を立体架構としてモデル化し、各節点に作用する鉛直方向慣性力を考慮して解析することが望ましいが、この方法では少なくとも建物の全節点数を自由度とする剛性マトリックスを用いた解析となるため、必ずしも実用的な方法とは言えない。そこで本論では、主に下層部にSoft Storyを有する中低層R C造架構を対象とし、現行の1次設計を対象とした弾性範囲内において上下地震動による柱軸方向力を算定するための比較的簡便な振動解析用置換モデルを提示し、この置換モデルを用いて算出した柱軸方向力の精度を検討する。

2. 上下地震動による柱軸方向力算定用置換モデル

(1) 置換モデルの作成方法

中低層R C造架構に対して上下地震動が作用する場合に生じる柱軸方向力を算定するための振動解析用置換モデルの作成方法を以下に述べる。ここで取り扱う建物は、中・上層部に連層耐震壁を有する有壁架構、および無壁架構である。置換モデルの作成方法の説明のために図-1に示す各階平面を有する建物を例として取り上げる。この建物の1階柱はすべて独立柱であり、2階以上に連層耐震壁が配置されている。直接剛性法の手法により架構の剛性を精密に評価して行った平面架構[2]および立体架構[3]の上下地震動に対する動的応答解析結果では、上下地震動による柱軸方向力（軸方向伸縮量）は同一層であっても柱位置によりかなり異なる（ただし、連層耐

震壁の付帯柱および耐震壁直下に配置された独立柱の軸方向伸縮量は各層においてほぼ相等しい) ことが明らかになったので、次のように各柱位置の 1 階から最上層までの柱を壁配置を考慮して切り出し、鉛直ばねモデルに置換する。

Case C 全層にわたり壁板が取り付かない独立柱の場合: 図-1 の A (柱位置 6) のように 1 階から最上層まですべて独立柱である場合には、その位置の柱のみを 1 階から最上層まで切り出し、図-2 (a) のような層数と同じ自由度を有する鉛直ばねモデルに置換する。図中、 k_i は置換モデル i 層のばね定数を表しており、この場合は柱のばね定数 (k_{ci}) を用いる。

Case W 中・上層部で壁板が取り付く柱の場合: 図-1 の B (柱位置 10と11) および C (柱位置 7と8と4) のように中・上層部で耐震壁の付帯柱となる場合には、壁板で接続される範囲で切り出し、まず図-2 (b), (c) の左図のようなモデルに置換する。図中、 k_{ci} および k_{wi} はそれぞれ i 層の柱および壁板のばね定数である。これらのモデルでは、はりは剛体とし、かつその回転を拘束して、同一層の柱および壁板の鉛直変位を等しく置いているので、各層において柱および壁板の鉛直ばねを一つの鉛直ばねに縮合して、図-2 (b), (c) の右図のような層数と同じ自由度を有する鉛直ばねモデルが作成できる。応答計算はこの置換モデルを用いて行う。

柱のばね定数 (k_{ci}) は式(1)、壁板のばね定数 (k_{wi}) は式(2)により算出することとし、圧縮・引張とも同一のばね定数を用いる。

$$k_{ci} = \frac{E A_{ci}}{h_i} \quad \dots \dots \dots (1), \quad k_{wi} = \frac{E A_{wi}}{h_i} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 E = 柱・壁板のヤング係数(本論では鉄筋の影響を無視して 210tf/cm^2 とした)、

A_{ci} = 柱の断面積、 A_{wi} = 内法スパンの壁板の断面積、 h_i = 階高

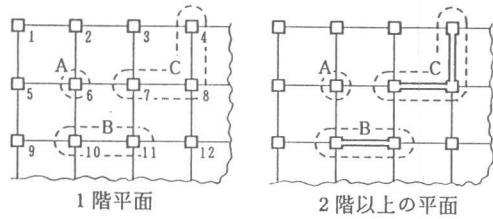
動的応答計算に用いる置換モデル(層数と同じ自由度を有する)の i 層のばね定数 (k_i) は一般的には切り出された範囲内の柱および壁板のばね定数の合計として式(3)で与えられる。

$$k_i = \sum k_{ci} + \sum k_{wi} \quad \dots \dots \dots (3)$$

置換モデル各層の重量 (W_i) は 切り出した範囲にある柱の負担床面積内の重量の総和とする。

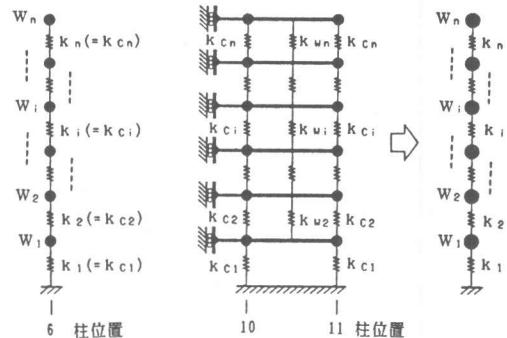
(2) 柱軸方向力の算出方法

置換モデルが上下方向地震動を受ける場合の強制振動方程式は式(4)で表される。

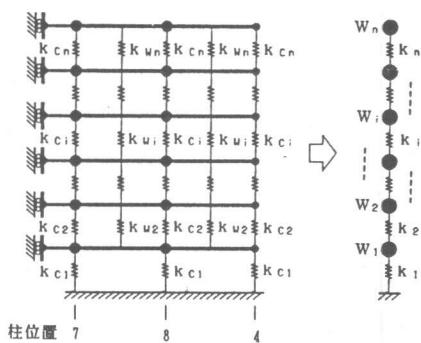


(注) 柱に付した数字は柱位置を示す。

図-1 対象建物例 (平面図)



(a) 図-1 の A の場合 (b) 図-1 の B の場合



(c) 図-1 の C の場合

図-2 置換モデル

ここに、[M]、[C]、[K]=置換モデルの質量、減衰および剛性マトリックス、

$\{\ddot{\delta}\}$ 、 $\{\dot{\delta}\}$ 、 $\{\delta\}$ = 基礎に対する各層の鉛直加速度、鉛直速度および鉛直変位、
 $\{\ddot{z}_G\}$ = 上下方向地動加速度

質量マトリックス $[M]$ は置換モデルの各層の質量を主対角要素にもつ対角マトリックスであり、剛性マトリックス $[K]$ は式(5)のようになる（空欄の要素は 0 である）。

$$[\mathbf{K}] = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 & & & \\ -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 & & \\ & & -K_{n-1} & K_{n-1} + K_n & -K_n \\ & & & -K_n & K_n \end{bmatrix} \dots \quad (5)$$

式(4)を用いて時刻歴応答解析を行えば、各時刻の各層の軸方向力を算出することができる。また、応答スペクトルを用いた解析により最大軸方向力を求めることが可能である。

図-2(b), (c) の場合のように切り出した範囲の同一層に複数の柱および壁板が存在する場合は、層数の自由度の置換モデルを用いて算出された軸方向力を各柱および壁板のばね定数に比例して分配する。

3. 置換モデルによる柱軸方向力の精度の検討 (1) 検討用架構モデル

置換モデルによる柱軸方向力の精度を検討するため、図-3に示す形状の6層 3×3 スパンR C造立体架構を設定し、その架構内に図-4に平面図で示すような種々の壁配置形式を有する架構および無壁架構を精度検討用架構として採用した。これらの架構はすべて1階が壁抜け層になっており、2階から最上層（6階）までの連層耐震壁が図-4中の太線で示す位置に配置されている。各床スラブのy方向に小ばかりが1本づつ配置される場合を想定し、x方向大ばかりのスパン中央（小ばかりと交差する点）に質点をもつ重量分布（図-5）とする。本論で用いる架構モデルは、分布質量を若干変更したことを除けば、架構寸法、部材断面寸法、架構の支持条件などは参考文献[3]で用いたものと同じである。

(2) 立体振動解析

19種類の立体架構（図-4）に対して、参考文献[3]で用いた解析手法を適用して地震動の上下成分を受ける場合の動的応答解析を行い柱軸方向力を求め、この軸方向力を精算値として置換モデルに

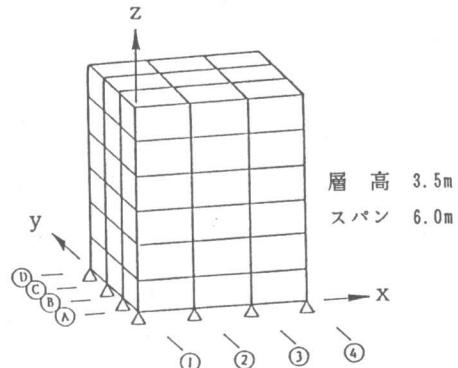


図-3 精度検討に用いる立体架構モデル

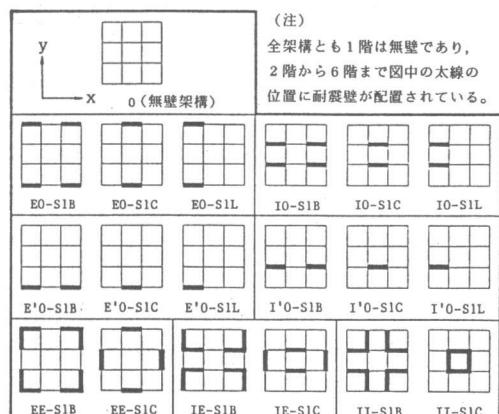
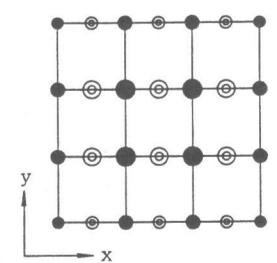


図-4 精度検討用立体架構の壁配置(平面図)



● 7.2 ◎ 8.6 ● 11.6

◎ 17.2 ● 20.0 单位：tf

図-5 重量分布(平面図)

より求めた柱軸方向力の精度検討の基準とする。入力地震波は、El Centro 1940 および Oita 1975 の 2 地震波の各上下(UD)成分であり、最大加速度が 100Gal になるように規準化して用いている。解析では 0.02 秒より長い固有周期をもつ次数のモードを考慮し、数値積分の時間刻みを 0.002 秒、継続時間を 10 秒、減衰定数をすべてのモードに対して 5 % として行った。

(3) 置換モデルを用いた振動解析

図-4 に示した 19 種類の立体架構に対して、前述した方法で置換モデルを作成すると、図-6 に示す 11 種類の置換モデルが得られる。図中の●印および太線は、それぞれ置換モデルとして切り出された範囲内にある柱位置および壁位置（2 階から最上層までに配置）を示している。これらの各置換モデルに対して、式(4) を用いて動的応答解析を行った。解析では 1 次モードのみを考慮し、数値積分の時間刻みを 0.002 秒、継続時間を 10 秒、減衰定数を 5 % としている。

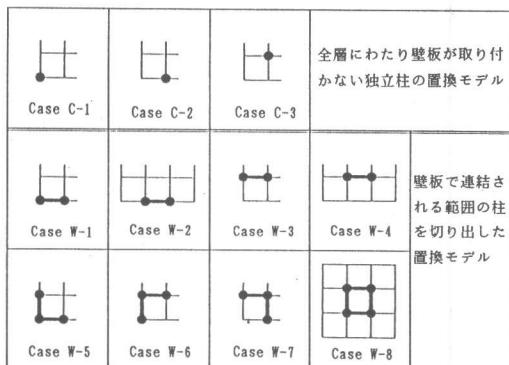


図-6 適用される置換モデル一覧（平面図）

(4) 1 階独立柱の最大軸方向力

置換モデルの動的応答解析により算出された 1 階柱の最大軸方向力（圧縮力および引張力の絶対値の最大値）と立体解析による精算値との比較の一例として、地震波 El Centro 1940 UD 成分に対する結果を図-7 に示す。図中○印は立体解析により求めた 1 階柱最大軸方向力 (D_{NE}) の鉛直荷重時軸方向力 (sN) に対する比を表しており、この比 (D_{NE}/sN) の平均値、標準偏差および変動係数を図の上部に示している。×印は置換モデルによる 1 階柱最大軸方向力 (D_{NA}) の sN に対する比である。鉛直荷重時軸方向力は現行の設計で通常用いられている負担面積よ

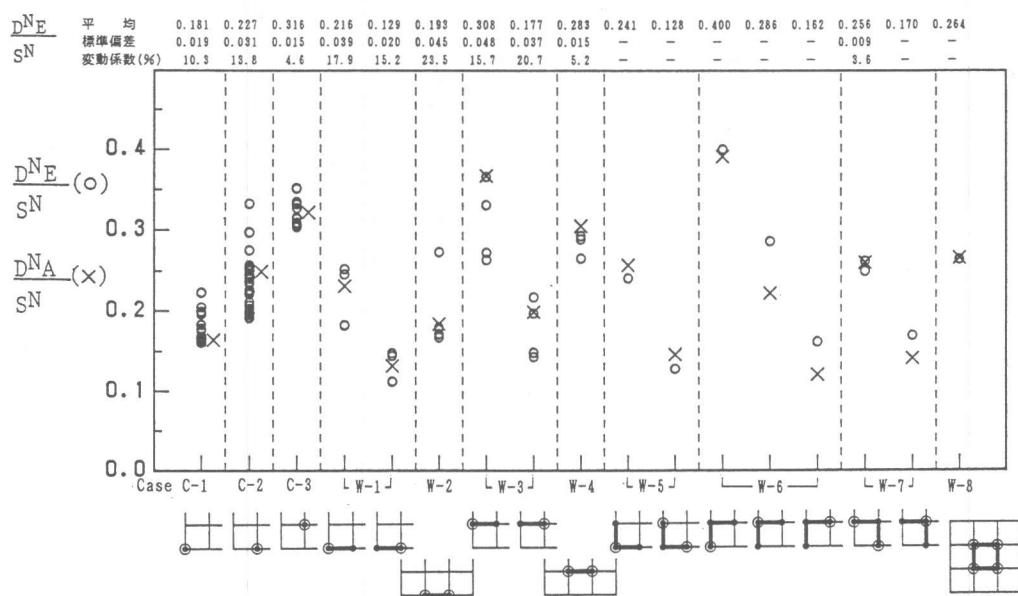


図-7 1 階柱の動的最大軸方向力の置換モデルによる値 (D_{NA}) と立体解析による精算値 (D_{NE}) との関係 (地震波: El Centro 1940 UD 100 Gal)

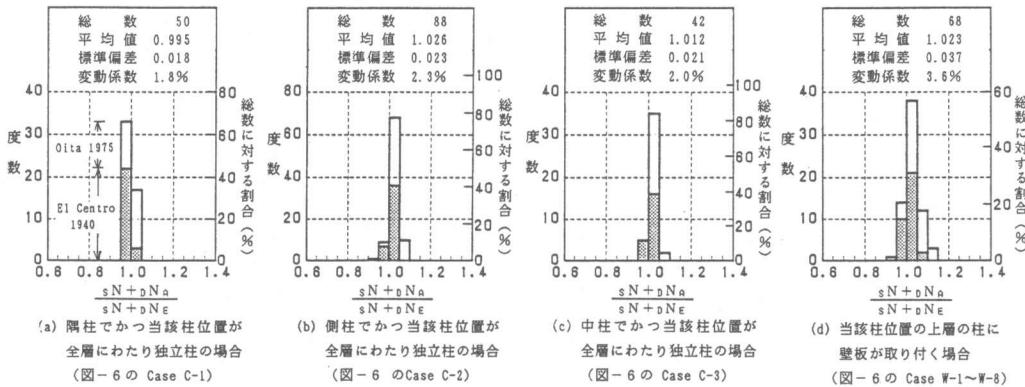


図-8 上下地震動を受ける場合に1階柱に生じる最大軸方向力の置換モデルによる値 ($sN + dN_A$) の立体解析による精算値 ($sN + dN_E$) に対する比の度数分布
(地震波: El Centro 1940 UD 成分および Oita 1975 UD 成分)

り算出する方法によって求めた。図より、置換モデルを用いて算出した上下方向入力時の最大軸方向力は、立体解析による精算値に比較的良く対応していることがわかる。なお、置換モデルを用いた解析による柱軸方向力応答の時刻歴は、立体解析による時刻歴とほぼ対応していた。

図-8は鉛直荷重時柱軸方向力を考慮した1階柱の柱軸方向力について、置換モデルを用いた解析より求めた最大軸方向力 ($sN + dN_A$) の立体解析により求めた最大軸方向力の精算値 ($sN + dN_E$) に対する比の度数分布を示している。同図では1階柱を4種類に分類して図(a), (b), (c), (d)に示している。図-8より、 $(sN + dN_A) / (sN + dN_E)$ の値はほぼ1に近く、変動も小さいことが分かる。全層にわたって独立柱になる場合(図(a)～(c))に比べると、当該柱位置の上層の柱に壁板が取り付く場合(図(d))において精度のばらつきがやや大きく現れているものの、最も過小評価になっている場合でも-7%、最も過大評価になっている場合でも+12%の誤差で収まっている。このように、上下地震動を受ける場合に1階柱に生じる最大軸方向力は、置換モデルを用いた解析により良い精度で評価できている。

4. 実在建物に対する適用例

実在したRC造有壁架構に対する適用例として、1975年大分県中部地震で被害を受けた地上4階地下1階のRC造ホテル[1]のCブロックに対して上下地震動により生じる柱軸方向力を置換モデルを用いて求め、この建物の立体動的応答解析による精算値[4]と比較した。

図-9はCブロック各階の壁配置を平面図で示している。各階の壁配置を考慮して、図中の破線で囲んだ部分の柱位置について置換モデルを適用する。これらの柱位置のうち、9'通りとG通り交点柱は全層にわたり壁板が取り付かない独立柱で構成されており、前述したCase Cの方法により置換モデルを作成する。また、残り9つの柱位置は上層において壁板で接続されており、Case Wの方法により置換モデルを作成する。これらの置換モデルに対して、式(4)を用いて前述の立体架構モデルの場合と同様の動的応答解析を行った。

図-10は、地震波のOita 1975の上下成分(最大加速度 100Gal)に対する置換モデルの動的応答解析より求めたCブロック1階柱の最大軸方向力(圧縮)および最小軸方向力(引張)と、立体動的応答解析[4]による最大(最小)柱軸方向力の精算値を鉛直荷重時軸方向力(sN :参考文献[1]に示されている)を考慮する形で比較している。この建物はかなり不規則な壁配置にな

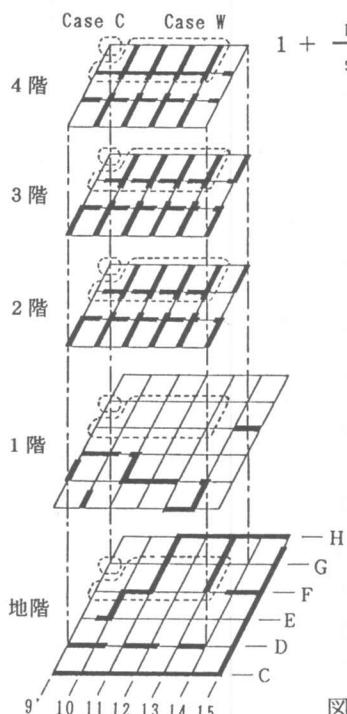


図-9 各階の壁配置と置換
モデルの適用

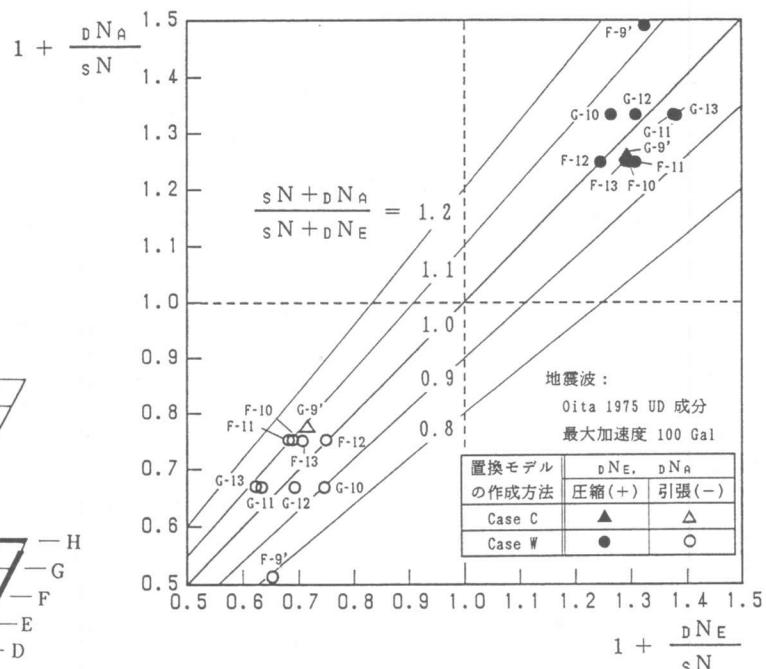


図-10 置換モデルによる動的最大（最小）柱軸方向力 (dN_A)
と立体解析による最大（最小）柱軸方向力 (dN_E) との
関係 (C ブロック 1 階独立柱)

っていたが、置換モデルを用いて算出した上下地震動を受ける場合の最大（最小）柱軸方向力 ($sN + dN_A$) は、立体解析による精算値 ($sN + dN_E$) に対して、地震波 El Centro 1940 UD 成分に対する結果も加えた全40ケース中34ケース (85%) で10%以内の誤差で収まっており、ほぼ良い精度で上下地震動による柱軸方向力応答が評価できていることがわかる。

5. まとめ

上下地震動を受ける中低層鉄筋コンクリート造有壁架構および無壁架構の柱軸方向力を比較的簡単な解析モデルを用いて評価する方法を検討した。本論では壁配置を考慮して作成する層数と同じ自由度の鉛直ばねモデルを提示し、本モデルを用いた解析結果を有壁および無壁立体モデル架構および実在建物の立体解析モデルに対する動的応答解析結果と比較した結果、本モデルを用いることにより、上下地震動による柱軸方向力応答を良い精度で評価できることが確認された。

謝辞

本研究を行うにあたり、元九州大学教授富井政英博士より有益なる御教示を頂きました。ここに記して、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：1975年大分県中部地震によるRC建物の被害調査報告、1976
- 2) 吉村浩二、菊池健児：地震動の上下成分が中低層鉄筋コンクリート造有壁平面架構の動的弾性挙動に及ぼす影響、日本建築学会論文報告集、第344号、1984、pp. 55～67
- 3) Kikuchi, K., Yoshimura, K. and Shinoda, H. : Effect of Vertical Component of Ground Motion on Seismic Elastic Behavior of Reinforced Concrete Space Frames with Shear Walls, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 8, 1986, pp. 435-442
- 4) Kikuchi, K., Fukushima, T. and Yoshimura, K. : Three-Dimensional Analysis of a R/C Building Structure Damaged during the Oita Earthquake of April 21, 1975, Proc. of Pacific Conference on Earthquake Engineering, Vol. 3, 1987, New Zealand, pp. 363-374